



SOLDADURA DE LIGAS DE ALUMÍNIO COM LASER DE DÍODOS

R.M. LEAL

ESAD

R. Isidoro I. A. de Carvalho

2500-917 Caldas da Rainha

Portugal

A. LOUREIRO

DEM-FCTUC

Pinhal de Marrocos, 3030

Coimbra, Portugal

e-mail: altino.loureiro@dem.uc.pt

Resumo: Este trabalho teve por objectivo o estudo do efeito do processo de soldadura com laser de díodos na soldadura de ligas de alumínio sensíveis à fissuração a quente. Verificou-se que o processo permite obter soldaduras com boa qualidade, sem fissuração a quente, embora com alguma porosidade. As ligas 2024-T3 e 6061-T4, apresentaram uma perda substancial de dureza na zona fundida e na zona afectada pelo calor, e a liga 5083-O uma redução de dureza mais reduzida, nestas zonas. Pelo contrário a liga 7075-O apresentou um aumento de dureza nestas zonas. As soldaduras nas ligas 5083-O e 6061-T4 apresentaram perdas de eficiência de respectivamente 21% e 12%. As soldaduras na liga 7075-O não apresentaram perda de eficiência. A dureza não deve ser usada para estimar a perda de eficiência das soldaduras.

1. INTRODUÇÃO

A soldadura por arco eléctrico de ligas de alumínio ocasiona invariavelmente uma zona fundida volumosa e uma zona afectada pelo calor relativamente larga, na ordem dos 15 a 20 mm. Esta última zona, apresenta normalmente perdas de resistência mecânica até aos 50% [1], devido à dissolução ou engrossamento dos precipitados de segunda fase, no caso de ligas tratáveis termicamente, ou devido à recristalização e crescimento de grão, no caso de ligas não tratáveis termicamente [2]. Outros problemas usuais na soldadura destas ligas são a porosidade, atribuída à dissolução do hidrogénio no metal fundido, e as deformações de soldadura [3,4].

Além disso, algumas ligas de alumínio, como por exemplo as ligas 2024, 6061 e 7075 apresentam tendência à fissuração a quente, quando soldadas por arco eléctrico [5].

O processo de soldadura laser de ligas de alumínio é muito atractivo para a indústria, não só devido à sua elevada velocidade e precisão dimensional, mas também devido à sua elevada densidade de potência adicionada [6]. De facto os lasers CO₂ e lasers sólidos Nd:YAG disponibilizam densidades de potência na ordem de 10¹⁰ a 10¹² W/m², ao contrário dos processos de soldadura por arco com densidades de 10⁶ a 10⁸ W/m² [7], o que contribui para a redução dos empenos e problemas metalúrgicos na soldadura de ligas de alumínio.

A elevada precisão dimensional do processo exige contudo elevada precisão dos elementos a soldar, o que obriga a grandes investimentos em todo o sistema produtivo. Além disso, a elevada densidade de potência disponibilizada leva à perda de elementos de liga voláteis, por vaporização [8].

Os laser de díodos se bem que forneçam uma densidade de potência (2x10⁸ W/m²) mais baixa que os laser de CO₂ e Nd:YAG, apresentam uma eficiência mais elevada que estes, na ordem dos 30% a 50%, contra 3% a 10% no laser de CO₂ e 1% a 4% nos lasers Nd:YAG [9]. Além disso os lasers de díodos são compactos e fáceis

de integrar em sistemas robotizados. Estes lasers são ainda pouco usados na soldadura de ligas de alumínio, sendo por vezes utilizados em conjunto com o processo MIG, em soldaduras híbridas de alta velocidade [10].

O objectivo do presente trabalho é o estudo do efeito do processo de soldadura com laser de díodos na soldadura de ligas de alumínio com sensibilidade à fissuração a quente. Neste estudo é ainda incluída uma liga Al-Mg com baixa sensibilidade à fissuração, que serve de termo de comparação.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizadas soldaduras com laser de díodos, sem material de adição, na direcção perpendicular à direcção de laminagem, em chapas com 1,6 mm de espessura, nas ligas de alumínio 6061-T4 e 7075-O, em chapas da liga 5083-O com 2 mm e 3mm de espessura e em chapas com 3,2 mm de espessura da liga 2024-T3. As soldaduras foram realizadas num laser de díodos da marca ROFIN, com 1500 W de potência. As condições gerais de soldadura foram as seguintes: distância focal de 37,2 mm, tamanho do foco 0,9x1,2 mm e ângulo do feixe 5 graus. O gás de protecção usado na raiz foi o azoto ou argon e do lado do feixe o argon, tendo a velocidade de soldadura sido variada entre 120 mm/min e 480 mm/min. Durante a soldadura as chapas foram presas com recurso a grampos colocados longitudinalmente, a curta distância da soldadura.

A análise metalográfica foi feita com o auxílio de um microscópio óptico da marca ZEISS Axiotech 100 HD. Para a revelação da microestrutura foram utilizados três tipos de reagentes; na liga 2024-T3 foi utilizado o reagente de Kroll (92 ml de água destilada, 6 ml de ácido nítrico e 2 ml de ácido fluorídrico), com a amostra imersa durante 20s; para as ligas 5083-O e 6061-T4 foi utilizado o reagente de Poulton modificado (50 ml de reagente de Poulton (12 ml de ácido clorídrico, 6 ml de ácido nítrico, 1 ml de ácido fluorídrico e 1 ml de água destilada), 25 ml de ácido nítrico e 40 ml de uma solução de 3 g de ácido crómico por 10 ml de água destilada), com imersão de 20s e 50s respectivamente; para a liga 7075-O foi usado o reagente de Keller (190 ml de água destilada, 5 ml de ácido nítrico, 3 ml de ácido clorídrico e 2 ml de ácido fluorídrico) com imersão durante 25s. Os ensaios de dureza HV1 foram executados na secção transversal à direcção de soldadura.

Foram retirados cinco provetes de tracção de cada chapa, na direcção perpendicular à soldadura, com uma largura útil de 10 mm e um comprimento de referência de 50 mm. Os ensaios foram realizados numa máquina INSTRON 4206, à temperatura ambiente, com uma velocidade de deslocamento do travessão da máquina de 1 mm/min.

Após ensaio as superfícies de fractura foram observadas num microscópio electrónico de varrimento da marca JEOL, JSMT 330 equipado com micro análise por RX da marca Tracor Northern.

Foram ainda traçadas as curvas de tensão real/deformação real de todos os provetes, com recurso às expressões da teoria da plasticidade, de modo a determinar o coeficiente de encruamento dos materiais presentes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Aspectos Operatórios

A velocidade máxima de soldadura conseguida foi de 480mm/min, para as chapas com 1,6 mm de espessura. Essa velocidade máxima foi limitada pela potência do laser, de apenas 1,5 kW.

Durante a soldadura observou-se uma deformação sensível na direcção longitudinal, nas chapas de 1,6 e 2 mm de espessura, devido à contracção nessa direcção. Nas chapas mais finas esta deformação pode ser suficiente para variar a distância focal, dificultando a soldadura, mesmo quando estes elementos estão fixos mecanicamente. Essa deformação é tendencialmente maior do que a que se observaria na soldadura com laser de CO₂, devido à menor densidade de potência e conseqüente aquecimento da zona circundante.

Nas chapas da liga 2024-T3, com 3,2 mm de espessura não se conseguiram soldaduras com penetração total, devido à restrição imposta pela potência do laser utilizado.

Verificou-se que uma adequada protecção gasosa na face e na raiz das soldaduras é fundamental para reduzir a formação de porosidades. Observou-se que, mesmo usando argon em caixa fechada na protecção da raiz, se obtinha alguma porosidade fina e dispersa desse lado, para todas as ligas soldadas. Isto sugere que outros factores podem contribuir para a formação de porosidade. Pástor et al [11] referem que a instabilidade na cavidade de vapor, no caso da soldadura Nd:YAG, é o responsável pela formação da porosidade.

Na soldadura da liga 6061-T4 ocorreu fissuração a quente, para velocidades na ordem de 120 mm/min. A morfologia da fissuração é mostrada na Fig. 1. Para velocidades de soldadura mais elevadas o fenómeno desapareceu. Neste caso foram testadas velocidades de soldadura até 240 mm/min.

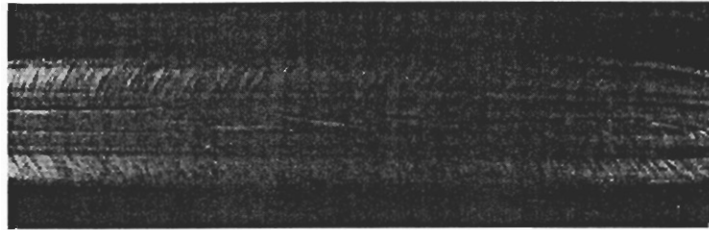


Fig. 1. Fissura na liga 6061-T4, $v=120\text{mm/min}$.

De acordo com Huang et al [5] a fissuração a quente na liga 6061 deve-se à fusão das partículas ricas em silício, presentes na zona parcialmente fundida da soldadura. A fissuração a quente não ocorreu para mais nenhum material ou condição de soldadura. Refira-se que a liga 5083-O é por natureza pouco sensível à fissuração a quente.

3.2. Microestrutura

A microestrutura da zona fundida e da zona afectada pelo calor é função do material de base considerado.

Na liga 2024-T3 o material de base tem o grão alongado segundo a direcção de laminagem, conforme se ilustra na Fig. 2-a), com dimensões médias de $45.8 \times 10.9 \mu\text{m}$. Nesta figura podem também observar-se diversos precipitados negros, que se constatou serem ricos em Mn, Fe e Cu, podendo ser precipitados do tipo $\text{Cu}_2\text{MnAl}_{20}$ e Cu_2FeAl_7 , e partículas mais claras ricas, em Cu, devendo provavelmente ser precipitados do tipo CuAl_2 . Na Fig. 2-b) mostra-se a linha de fusão de uma soldadura nesta liga. Do lado esquerdo observa-se a zona afectada pelo calor, constituída por grãos mais arredondados que os do material de base, se bem que ainda mantenham alguma orientação preferencial. O grão engrossou ligeiramente, passando em média para $49.6 \times 16.3 \mu\text{m}$. Do lado direito observa-se a zona fundida, com o grão orientado segundo a direcção de escoamento de calor e com algum crescimento epitaxial.

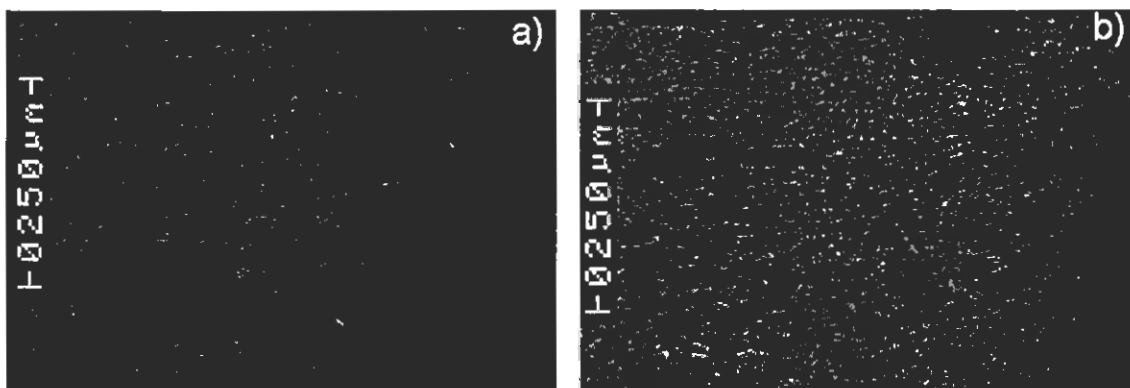


Fig. 2. Liga 2024-T3, reagente de Kroll; a) Material de base; b) Zona de transição, $v=180\text{mm/min}$.

A zona fundida é formada por uma estrutura dendrítica, apresentando grão alongado próximo da linha de fusão e grão equiaxial na zona central da soldadura, conforme se mostra na Fig. 3. A estrutura nesta zona é mais refinada que no material de base.



Fig. 3. Zona fundida da liga 2024-T3, reagente de Kroll, $v=180\text{mm/min}$.

A microestrutura da liga 5083-O é constituída por grão arredondado, com tamanho médio de $23\ \mu\text{m}$, conforme se ilustra na Fig. 4-a). Esta microestrutura resulta do tratamento térmico de recozido sofrido pela chapa. Na Fig. 4-b) ilustra-se, numa ampliação menor, a linha de fusão de uma soldadura realizada nesta liga com uma velocidade de $150\ \text{mm/min}$. Do lado direito observa-se a estrutura dendrítica com formação de grão epitaxial e na zona central observa-se a zona afectada pelo calor, com grão equiaxial fino, da ordem de $19.7\ \mu\text{m}$.

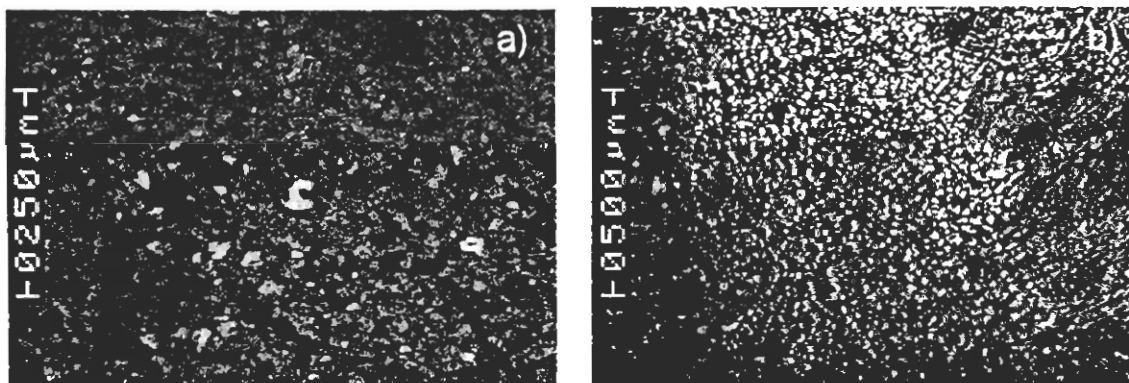


Fig. 4. Liga 5083-O, reagente de Poulton modificado; a) Material de base; b) Zona de transição, $v=150\text{mm/min}$.

A Fig. 5 mostra a estrutura dendrítica da zona fundida que evidencia uma orientação preferencial. Esta estrutura apresenta constituintes ricos em Mg e Si, presumivelmente Mg_2Al_3 e Mg_2Si .

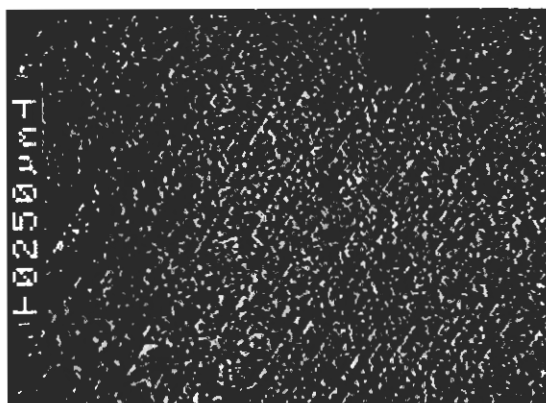


Fig. 5. Zona fundida da liga 5083-O, reagente de Poulton modificado, $v=150\text{mm/min}$.

A estrutura da liga 6061-T4 apresenta o grão alongado segundo a direcção de laminagem, conforme se mostra na Fig. 6-a), com dimensão média de $49.6 \times 20.1 \mu\text{m}$. Na zona afectada pelo calor, ilustrada na Fig. 6-b), verificou-se a recristalização e engrossamento do grão, ficando este aproximadamente equiaxial, com $40.8 \mu\text{m}$. Nesta figura observam-se alguns precipitados finos, os quais são ricos em Al, Si e Fe, podendo tratar-se de $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$.

Na linha de fusão verifica-se uma transição abrupta do grão equiaxial da zona afectada pelo calor para grão alongado mais fino, com crescimento epitaxial.

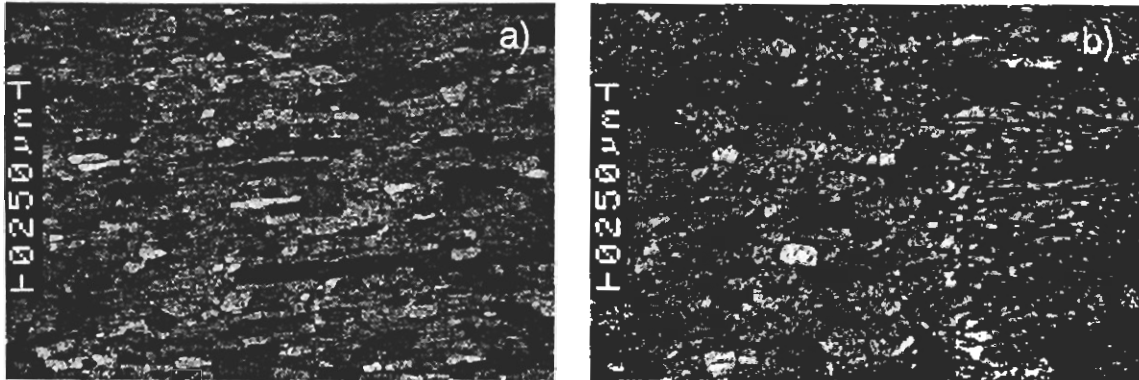


Fig. 6. Liga 6061-T4; reagente de Poulton modificado; a) Material de base; b) Zona de transição, $v=240\text{mm/min}$.

Na zona fundida, observa-se uma estrutura dendrítica celular, que se forma desde a linha de fusão até ao centro da soldadura, conforme Fig. 7.



Fig. 7. Zona fundida da liga 6061-T4, reagente de Poulton modificado, $v=240\text{mm/min}$

Na liga 7075-O o grão do material de base não é discernível no microscópio óptico, quando a contrastação é feita com o reagente de Keller, conforme se observa na Fig. 8-a). Contudo, na zona afectada pelo calor, mais próximo da linha de fusão, o mesmo contrastante revela o grão, tal como se mostra na Fig. 8-b).

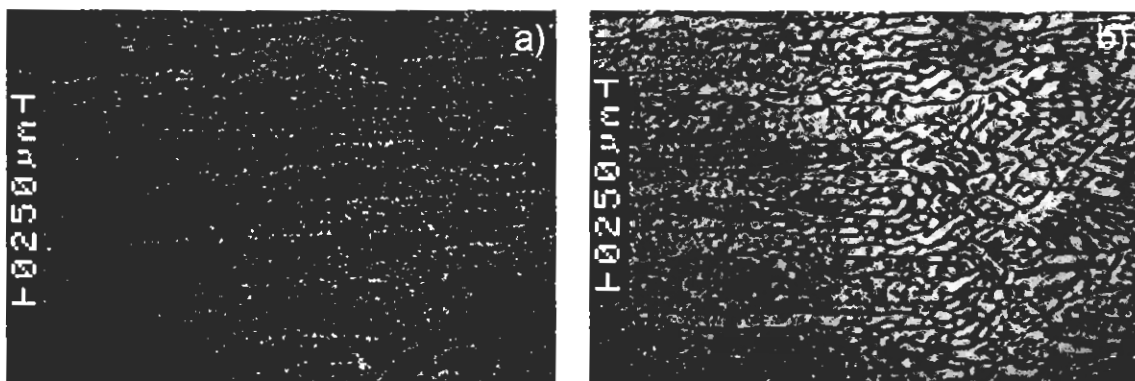


Fig. 8. Liga 7075-O; reagente de Keller; a) Material de base; b) Zona de transição, $v=180\text{mm/min}$.

Verifica-se que nesta zona o grão permanece alongado na direcção de laminagem, podendo atingir comprimento superior a 250 μm . Com o aproximar da zona de soldadura, o tamanho de grão tem tendência a engrossar moderadamente e a perder a orientação preferencial, veja-se Fig. 8-b). Nesta zona observa-se ainda a presença de muitos precipitados, que ainda não foram analisados.

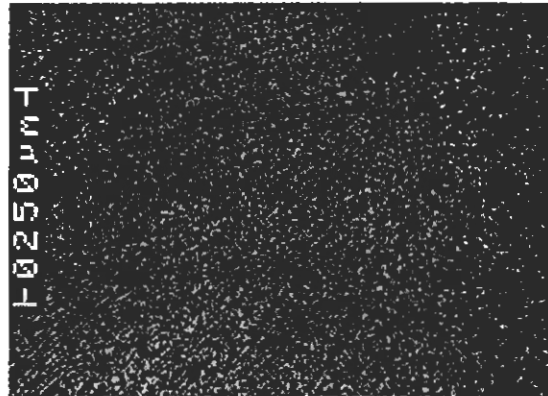


Fig. 9. Zona fundida da liga 7075-O, reagente de Keller, $v=360\text{mm/min}$.

Na zona fundida observou-se uma estrutura dendrítica fina com orientação aleatória, conforme Fig. 9, tendo-se verificado que para valores de velocidade inferiores essa orientação é mais uniforme (vertical ou horizontal).

3.3. Dureza

Na liga 2024-T3 verifica-se um acentuado decréscimo da dureza na zona fundida, cerca de 30% relativamente à dureza do material de base (faixa a cinzento), conforme Fig. 10. Esse decréscimo é em princípio devido à dissolução de precipitados, verificada durante a soldadura.

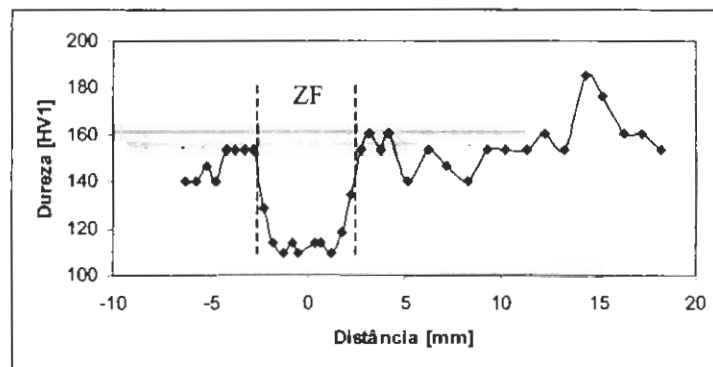


Fig. 10. Distribuição de durezas na liga 2024-T3, $v=180\text{mm/min}$.

Na zona afectada pelo calor verifica-se uma perda de dureza, menos acentuada que na zona fundida, na ordem de 12,5%, o que indicia a dissolução apenas parcial das partículas de segunda fase. Perdas de dureza semelhantes são referidas nesta liga, em soldaduras laser e também com feixe de electrões [12].

A largura da zona fundida é na ordem dos 6 mm e da zona afectada pelo calor também não ultrapassa 7 a 8 mm, os quais são valores abaixo dos obtidos nos processos de soldadura por arco eléctrico de ligas de alumínio [1].

Na liga 5083-O, os valores de dureza não são muito afectados, por a liga estar no estado de recozida e não ter sofrido processo de endurecimento significativo, não sendo por isso muito afectada pelo calor adicionado pelo processo de soldadura, conforme se ilustra na Fig. 11. A linha a cinzento indica a dureza média da liga 5083-O. A perda de dureza em qualquer das zonas é inferior a 10% e estende-se por uma distância na ordem de 12 mm de um e outro lado da soldadura. Variações de dureza similares foram já observadas na soldadura com laser de CO_2 de ligas da mesma família no estado "O" [13].

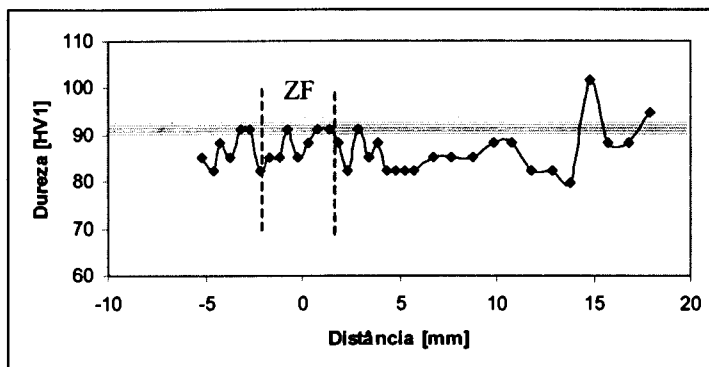


Fig. 11. Distribuição de durezas na liga 5083-O, $v=150\text{mm/min}$.

Na liga 6061-T4, existe uma diminuição nos valores da dureza na zona fundida de aproximadamente 20%, sendo menor que o decréscimo verificado na liga 2024-T3, conforme se ilustra na Fig. 12.

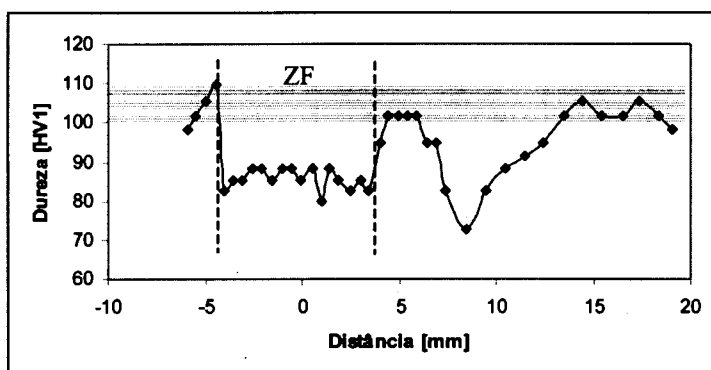


Fig. 12. Distribuição de durezas na liga 6061-T4, $v=120\text{mm/min}$.

Na zona afectada pelo calor observa-se também uma perda de dureza, que pode ultrapassar 30%, a qual é normalmente atribuída ao engrossamento dos precipitados, engrossamento esse induzido pelo ciclo térmico [14]. Em ligas da mesma família, soldadas com laser de CO_2 , foram referidas perdas de dureza na zona afectada pelo calor na ordem de 25% [13].

A largura da zona fundida é maior do que nos casos anteriores, porque foi utilizada a mesma velocidade de soldadura para espessuras das chapas de 1,6 mm de espessura, inferiores aos 3 mm utilizados anteriormente.

Na liga 7075-O, os valores de dureza aumentaram na zona de soldadura, sendo mais elevados na zona termicamente afectada que na própria zona fundida, conforme se ilustra na Fig. 13.

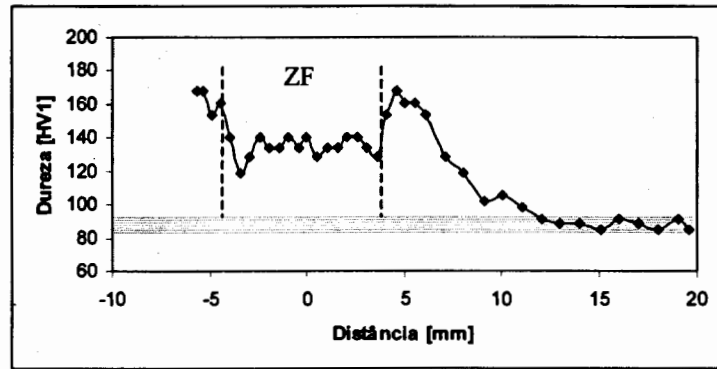


Fig. 13. Distribuição de durezas na liga 7075-O, $v=180\text{mm/min}$.

Este comportamento deve-se ao facto de a liga estar no estado recozido, portanto com baixa dureza, e ter sido soldada, ficando sujeita ao envelhecimento natural nas zonas fundida e afectada pelo calor [14]. Este endurecimento por precipitação à temperatura ambiente tende a ocorrer nesta liga durante um período superior a um mês, após a realização das soldaduras. Neste caso todas as medições de dureza foram realizadas 60 dias após a realização das soldaduras.

3.4. Ensaio de tracção

Os ensaios de tracção realizados nas soldaduras liga 5083-O mostraram que a fractura se verifica sempre na zona fundida das soldaduras. A Tabela 1 ilustra as propriedades mecânicas médias desta liga e das soldaduras nela realizadas. A Fig. 14 apresenta exemplos de curvas tensão/deformação de provetes extraídos do material de base e das soldaduras.

Tabela 1. Valores obtidos dos ensaios de tracção da liga 5083-O.

Referência	σ_{elast} MPa	σ_u MPa	ϵ_r %	v_{carga} mm/min	Local de rotura	n	η
5MB	118,3	239,7	20,1	1	-	0,26	-
5L2C	93,6	187,0	6,8	1	ZF	0,24	0,79

σ_{elast} – tensão limite de elasticidade; σ_u – resistência máxima à tracção; ϵ_r – deformação na rotura; v_{carga} – velocidade de carregamento; n – coeficiente de encruamento; η – eficiência da ligação; ZF – zona fundida

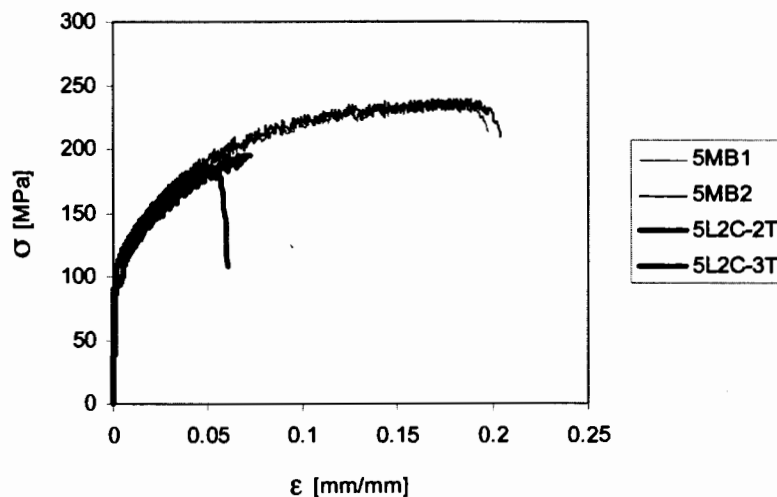


Fig. 14 - Diagrama dos ensaios de tracção na liga 5083-O.

A realização da soldadura com laser de díodos produz nesta liga uma redução da eficiência da ligação na ordem de 21%. Define-se aqui a eficiência como a razão entre o limite elástico da ligação soldada e o limite elástico do material de base. A redução da eficiência está qualitativamente de acordo com a redução de dureza observada, se bem que aquela seja superior à que a redução de dureza deixava prever.

Observa-se ainda que a deformação na rotura se reduz drasticamente nas ligações soldadas. Este comportamento é ocasionado pela concentração da deformação plástica na zona fundida das soldaduras, embora o material de base sofra também alguma deformação plástica. De facto o encruamento da zona fundida leva à transferência de uma parte da deformação plástica para o material de base, conforme se ilustra na Fig. 14.

A variação do coeficiente de encruamento, mostrada na Tabela 1, resulta da comparticipação das duas zonas na deformação plástica.

As propriedades mecânicas médias da liga 6061-T4 e das respectivas soldaduras estão indicadas na Tabela 2 e ilustradas na Fig. 15. Observa-se que todos os provetes romperam na zona afectada pelo calor, o que está de acordo com a dureza mínima observada nas soldaduras.

Tabela 2 - Valores obtidos dos ensaios de tracção da liga 6061-T4.

Referência	σ_{elast} MPa	σ_u MPa	ϵ_r %	v_{carga} mm/min	Local de rotura	n	η
6MB	171,9	284,9	21,5	1	-	0,20	-
6L1,6B	152,1	216	5,0	1	ZAC	0,18	0,88

σ_{elast} – tensão limite de elasticidade; σ_u – resistência máxima à tracção; ϵ_r – deformação na rotura; v_{carga} – velocidade de carregamento; n – coeficiente de encruamento; η - eficiência da ligação; ZAC – zona afectada pelo calor.

Neste caso a perda de eficiência foi na ordem de 12% enquanto a perda de dureza ultrapassou 30%. Esta menor perda de resistência mecânica pode dever-se ao facto de ser uma liga que tende a envelhecer naturalmente, recuperando parte da resistência perdida durante a operação de soldadura.

A redução da deformação na rotura deveu-se à concentração da deformação plástica nesta zona afectada, com fraca transferência de deformação para o material de base. Esta fraca capacidade de transferência da deformação é evidenciada pelo menor coeficiente de encruamento dos provetes soldados, quando comparados com os da liga 5083-O.

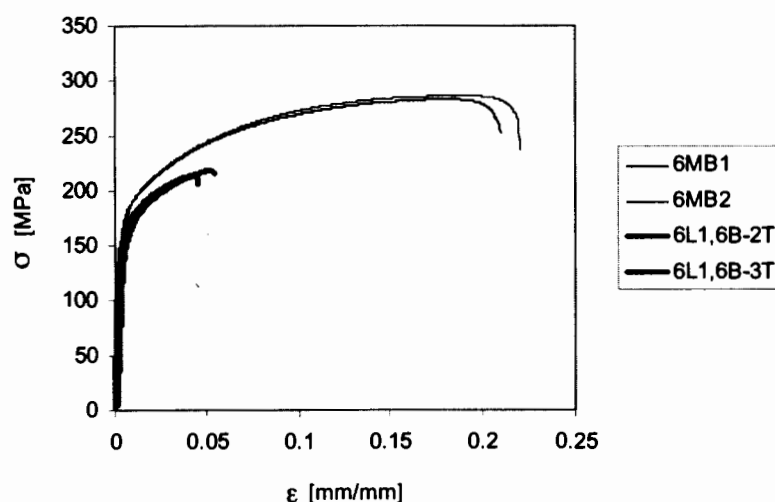


Fig. 15 - Diagrama dos ensaios de tracção na liga 6061-T4.

A Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas da liga 7075-O e das juntas soldadas nesta liga e a Fig. 16 mostra algumas curvas tensão/deformação destes materiais. Nesta liga, em que tinha sido evidenciado o aumento dos valores de dureza na soldadura, constatou-se que a fractura das juntas soldadas ocorreu sempre no material de base. As propriedades mecânicas indicadas na Tabela 3 são portanto todas referentes ao material de base.

A deformação na rotura dos provetes soldados é inferior à do metal de base, porque a zona fundida e a zona afectada pelo calor não devem sofrer deformação plástica significativa durante o ensaio. De facto, considerando uma largura desta zona na ordem de 15 mm, de acordo com o gráfico de dureza da Fig. 13, o comprimento efectivo de ensaio será de 35 mm em vez de 50 mm, a que corresponde um $\epsilon_r = 16.8\%$. Este valor de deformação na rotura é idêntico ao da liga 7075-O. Isto sugere que o limite elástico destas duas zonas é muito superior ao do material de base. De facto esta liga no estado de tratamento T6, por exemplo, apresenta uma tensão limite de elasticidade quase cinco vezes superior à observada quando a liga se encontra no estado "O" [15].

Tabela 3 - Valores obtidos dos ensaios de tracção da liga 7075-O

Referência	σ_{elast} MPa	σ_u MPa	ϵ_r %	v_{carga} mm/min	Local de rotura	n	η
7MB	98,3	196,7	16,4	1	-	0,19	-
7L1,6D	97,8	204,9	11,8	1	MB	0,28	1

σ_{elast} – tensão limite de elasticidade; σ_u – resistência máxima à tracção; ϵ_r – deformação na rotura; v_{carga} – velocidade de carregamento; n – coeficiente de encruamento; η - eficiência da ligação; MB – material de base.

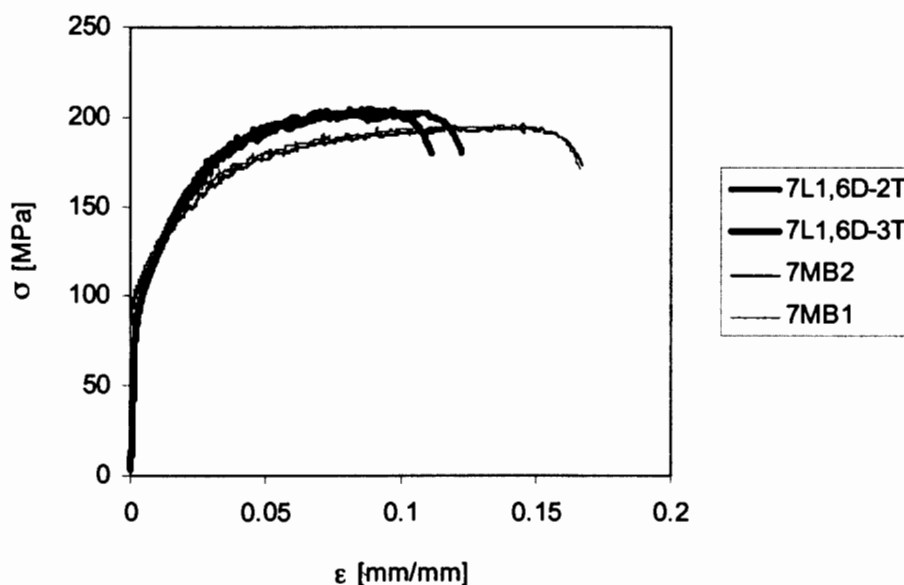


Fig. 16 - Diagrama dos ensaios de tracção na liga 7075-O.

Não foram realizados ensaios de tracção nas soldaduras na liga 2024-T3 devido ao facto de estas não apresentarem penetração total.

4. CONCLUSÕES

Foi realizado um estudo sobre os efeitos do laser de díodos na soldadura de ligas de alumínio sensíveis à fissuração a quente. O trabalho realizado permitiu extrair as seguintes conclusões:

- 1 — Este processo permite a realização de soldaduras com boa qualidade, embora possam apresentar alguma porosidade muito fina;
- 2 — O processo provoca o empeno dos elementos mais finos, pelo que estes devem ser bem fixos antes da operação de soldadura;
- 3 — As soldaduras nas ligas 2024-T3, 5083-O e 7075-O não sofreram fissuração a quente, tendo-se observado fissuração na solidificação na liga 6061-T4, apenas para a velocidade de soldadura de 120 mm/min;
- 4 — Na zona afectada pelo calor das soldaduras observou-se a alteração da forma do grão e na zona fundida a formação de estruturas dendríticas, com crescimento epitaxial do grão, junto à linha de fusão;
- 5 — A soldadura com laser de díodos provoca reduções de dureza na zona fundida e na zona afectada pelo calor das soldaduras nas ligas 2024-T3, 6061-T4 e 5083-O; pelo contrário, na liga 7075-O observaram-se aumentos de dureza nessas zonas;
- 6 — As soldaduras nas ligas 5083-O e 6061-T4 apresentaram perdas de eficiência respectivamente de 21% e 12%. As soldaduras na liga 7050-O não apresentaram perda de eficiência;
- 7 — Os resultados dos ensaios de dureza não devem ser utilizados para estimar a eficiência das soldaduras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Soldadura e Qualidade o apoio na realização das soldaduras. Agradecem também o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, através do programa POCTI. A Comunidade Europeia, o Governo Português e o FEDER fazem parte deste programa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Loureiro, P. Medina, G. Ten Jua, «Propriedades Mecânicas de Soldaduras em Ligas de Alumínio», *Actas de Materiais* 97, 2-51 – 2-58 (1997).
- [2] ASM Handbook, Welding, Brazing and Soldering, Vol. 6, ASM International, 4th print (1997).
- [3] G. M. Reddy and A. A. Gokhale, «Gas tungsten arc welding of 8090 Al-Li alloy», *Trans. Indian Inst. Metals*, Vol. 46(1), 21-30 (1993).
- [4] O.R. Myhr, S. Klokkehaug, Ø. Grong, H.G. Fjaer and A.O. Kluken, «Modeling of Microstructure Evolution, Residual Stresses and Distortions in 6082-T6 Aluminum Weldments», *Welding Journal*, 77(7), 286s-292s (1998).
- [5] C. Huang and S. Kou, «Liquation Mechanisms in Multicomponent Aluminum Alloys during Welding», *Welding Journal*, 81(10), 211s-222s (2002).
- [6] M. Kutsuna, S. Kitamura, K. Shibata, H. Sakamoto, K. Tsushima, «Improvement of the joint performance in laser welding of aluminium alloys», IIW Doc-1603-03 (2003).
- [7] J. Norrish, *Advanced Welding Processes*, Institute of Physics Publishing, Bristol (1992).
- [8] H. Zhao, D.R. White, T. DebRoy, «Current issues and problems in laser welding of automotive aluminium alloys», *International Materials Reviews*, Vol. 44, Nr 6, 238-266 (1999).
- [9] http://www.ndx.com/printpage.asp?article_id=141.
- [10] H. Tong, T. Ueyamat, Y. Yazawa, M. Hirami, K. Nakata, T. Kiharat, M. Ushido, «High speed welding of aluminium alloy sheets with laser assisted AC pulsed MIG process», ICRA-2002-SING 33 (2002).

- [11] M. Pástor, H. Zhao y T. DebRoy, «Formación de porosidad durante la soldadura laser de Nd:YAG de onda continua en aleaciones de aluminio para aplicaciones automotrices», *Rev. Metal. Madrid*, 36, 108-117 (2000).
- [12] G. Cam, J. F. Dos Santos, M. Koçak, «Laser and electron beam welding of aluminium alloys: literature review», *IIW Doc IX-1896-98* (1998).
- [13] S. Venkat, C. E. Albright, S. Ramasamy and J. P. Hurley, «CO₂ laser beam welding of aluminium 5754-O and 6111-T4 alloys», *Welding J.* 77(7), 275s-282-s (1997).
- [14] B. Skrotzki, J. Murken, «Comparison of laser-beam welding and friction stir welding of age-hardenable aluminium alloys», *Proc. from Materials Solutions Conference*, 343-350, Indianapolis, ASM International (2001).
- [15] ASM Handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Vol. 2, ASM International, 4th Print (1995).

DIODE LASER WELDING IN ALUMINIUM ALLOYS

Abstract: The aim of this research is the study of the effect of diode laser welding process on welds in hot cracking susceptible aluminium alloys. Welds with good quality were obtained with this process, without hot cracking, though some small porosity is always present. Welds in alloys 2024-T3 and 6061-T4 showed a significant decrease in hardness in the weld metal and heat-affected zone and alloy 5083-O exhibited only a small decrease in hardness in the same zones. On the contrary, alloy 7075-O exhibited a significant increase in hardness in these zones. A decrease of joint efficiency of 21% and 12% was observed in welds on alloys 5083-O and 6061-T4, respectively. Welds on alloy 7075-O do not show any loss in the weld joint efficiency. A criterion based on hardness measurements should not be used to estimate the weld joint efficiency.